

类锂-Al⁺¹⁰ 离子 4f-3d 跃迁的软 X 射线 ASE 增益实验*

陈时胜 徐至展 林礼煌 范品忠 张正泉

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

在六路激光等离子体装置上已成功地进行了复合泵浦机制的软 X 射线自发发射放大 (ASE) 的演示实验。利用自制的针孔透射光栅谱仪, 已观测到激光产生的线状等离子体中, 类锂-Al⁺¹⁰ 离子的 4f-3d 跃迁 (154.7 Å) 的 ASE 增益放大。测量了一组不同长度线状等离子体的类锂-Al⁺¹⁰ 离子 4f-3d 跃迁线沿轴线发射的时间积分谱线强度。结果表明, 该谱线发射强度随等离子体长度呈指数式增长, 相应的增益系数为 $3.7 \pm 0.9 \text{ cm}^{-1}$, 其最大增益长度积约为 2.7。

关键词: 软 X 射线激光; 增益系数。

一、引 言

利用激光等离子体作为增益介质的 X 射线激光研究, 是激光等离子体研究领域最富吸引力的课题之一, 迄今已有不少成功演示软 X 射线 ASE 的报道^[1~7]。在这些研究中, 产生 X 射线激光的主要泵浦机制有两种: 电子碰撞激发和三体复合泵浦。对于电子碰撞激发, 要求等离子体具有高温及高密度 ($0.5 \sim 1 \text{ keV}$, $10^{20} \sim 10^{21} / \text{cm}^3$), 为得到短波长需要产生高 Z 元素的高剥离态的离子, 因此, 要求的靶面激光功率密度 $\sim 10^{18} \text{ W/cm}^2$, 大部分实验只能在一些巨型激光驱动器装置上进行。

相对而言, 三体复合泵浦机制要求等离子体的条件较低 ($\sim 50 \text{ eV}$, $10^{19} / \text{cm}^3$)。要求的靶面激光功率密度 $\sim 10^{12} \text{ W/cm}^2$, 因此, 可利用中小型激光驱动器进行实验。而且可按等电子序关系 $\lambda \propto 1/Z^2$ 将激光波长推向短波。例如:

$$Z \approx 2/3 [AT_0 (\text{eV})]^{1/3}, \quad (1)$$

(式中, Z——电离度, 对 O^{+6} , $Z=6$; A——原子序数, 对 O, $A=6$); 由公式(1)可估算出对某种元素需产生的电离度时, 所要求的初期等离子体温度 T_0 。由公式:

$$\frac{T_0}{1 \text{ keV}} \approx 0.6 \left[\frac{1}{f} \left(\frac{I_{\text{obs}}}{10^{14} \text{ W/cm}^2} \right) \left(\frac{\lambda}{1 \mu\text{m}} \right)^{2/3} \right], \quad (2)$$

可估算在初始等离子体温度 T_0 要求下, 靶面激光功率密度 I_{obs} 。我们对类 Li-Al⁺¹⁰ 做一简单估算: 由于是复合过程产生类 Li-Al⁺¹⁰, 激光过程是发生在类 Li-Al⁺¹⁰ 离子的 5f-3d (105.7 Å) 或 4f-3d 跃迁 (154.7 Å) 上。因此, 必须产生初始高丰度的类 He-Al⁺¹¹ 离子, 经复合后成类 Li-Al⁺¹⁰, 即: 类 He-Al⁺¹¹ $\xrightarrow{e^-}$ 类 Li-Al⁺¹⁰。产生类 He-Al⁺¹¹ 要求的等离子

收稿日期: 1990年3月29日; 收到修改稿日期: 1990年5月4日

* 国家高技术及国家自然科学基金和中科院重大基金支持课题。

体初始温度 $T_e \approx 345 \text{ eV}$, 相应的靶面激光功率密度 $\sim 1.2 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 。由此可见, 在复合泵浦机制中, 尤其对类锂离子复合泵浦机制, 它对驱动激光的要求不仅比电子碰撞激发机制低得多, 而且也比类氫离子复合泵浦低, 对驱动激光的脉宽及波长要求也不苛刻。此外, 它以 $\lambda \propto 1/Z^{5/2}$ (类氫是以 $\lambda \propto 1/Z^2$) 定标至短波长。因此, 采用类锂复合机制, 有可能在小规模的激光驱动器上演示 ASE 激光作用, 而且可在较大规模的激光驱动装置 (例如上海光机所的 LF-12[#] 激光装置) 上将 X 射线激光波长推到接近“水窗”范围 (23.3~43.8 Å) 或获得更高的增益长度积值。

日本大阪大学和英国卢瑟福实验室^[8]用二倍频钕玻璃激光辐照铝靶曾获得 $\text{Al}^{+10}5f-3d$ (105 Å), $5d-3p$ (103.8 Å) 以及 $4f-3d$ (154.7 Å) 跃迁的 ASE。日本理化研究所, 在更小规模的激光装置上获得了 $\text{Al}^{+10}5f-3d$ 和 $4f-3d$ 跃迁的 ASE^[9]。

基于上述考虑, 我们在我所的六路激光装置上^[10], 用线聚焦激光辐照铝平面靶并用自制的透射光栅谱仪和一维空间分辨掠入射光栅谱仪进行了软 X 射线激光增益实验, 获得了复合泵浦类锂 Al^{+10} 离子的 $4f-3d$ (154.7 Å)、以及 $5f-3d$ (105.7 Å)^[15] 跃迁的软 X 射线辐射的显著放大的实验结果。

二、实验布局

实验是在六路激光装置上进行的, 实验排布如图 1 所示。实验中, 将六路激光中的两路

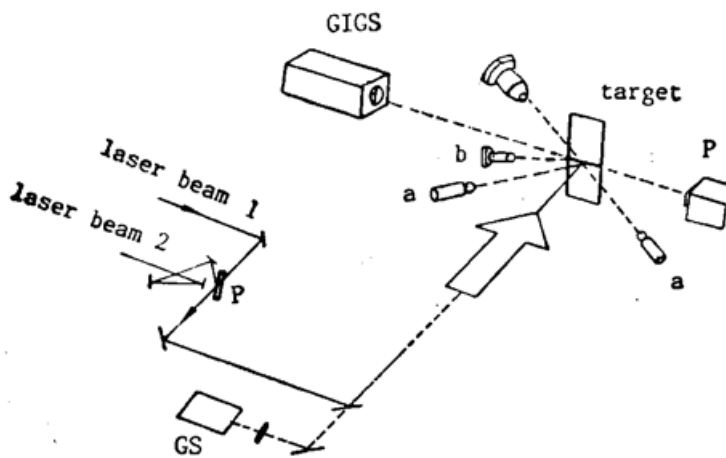


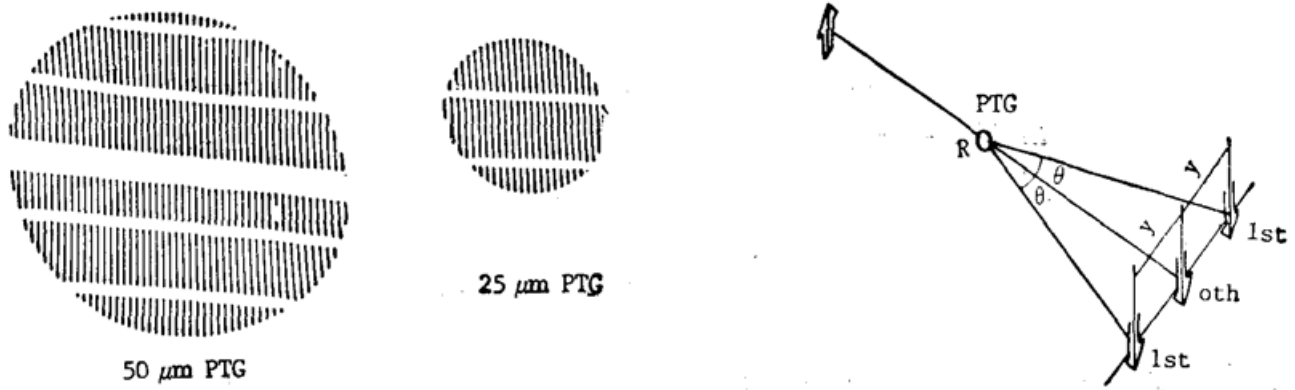
Fig. 1 Schematic setup of the experiments

GIGS—grazing incidence grating spectrograph; PTGS—pinhole transmission grating spectrograph; GS—grating spectrograph; a—Faraday cup; b—X-ray pinhole camera; c—TiAP falt-crystal X-ray spectrograph; P—polarizer

光束用偏振组合成同轴线的, 相互完全重叠的一束激光, 波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 。打靶激光由双脉冲组成, 单个脉冲宽度为 $250 \sim 300 \text{ ps}$, 两脉冲间隔为 200 ps 。通过一个 $f/2$ 非球面透镜和一个柱面透镜组合成的聚焦系统, 将入射激光聚焦成长度为 10 mm 、横向尺寸 (FWHM) $150 \mu\text{m}$ 的焦线, 相应的靶面功率密度为 $1.5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 。从而产生作为激光增益介质的线状高阶离化态的激光等离子体。实验中使用厚度为 1 mm 的条状平板铝靶; 在过去的实验中^[11], 我们观测到在热等离子体和冷的靶物质的交界处, 存在着大尺度的“牛角尖”状等离子

体喷流结构, 即大的密度梯度。为了避免这种边界效应对 X 射线传输或再吸收的影响, 并且为保证使用照明的均匀的焦线中央区域以及维持靶面激光功率密度的一致性, 我们通过改变靶的宽度来获得不同长度的等离子体, 并且靶的宽度总是小于激光焦线长度。

实验中使用的主要诊断设备是我们自行研制的一台透射光栅谱仪^[12] 和一台具有空间分辨能力的消像散掠入射 XUV 光栅谱仪^[13]。两台谱仪被分别放置于水平焦线两端并同焦线准直。



(a) SEM photograph ($\times 1500$) of the $25\mu\text{m}$ and $50\mu\text{m}$ diameter PTGs. Grating bar spacing is $1\mu\text{m}$

(b) Schematic diagram of PTG's dispersion and imaging. The spectral resolution are $\sim 4\text{\AA}$ and $\sim 2\text{\AA}$ for PTGs with 1000 lines/mm and 2000 lines/mm, respectively

Fig. 2 (a) SEM photographs of the pinhole transmission grating (PTG) and (b) the schematic diagram of the PTG's dispersion and imaging

自制的透射光栅谱仪是带有 $\phi 50\mu\text{m}$ 和 $\phi 25\mu\text{m}$ 的自由支撑的金箔透射光栅 (如图 2 所示), 光栅刻线有 2000 lines/mm 及 1000 lines/mm 两种。光谱分辨率分别为 2\AA 及 4\AA 。摄谱范围 $10\sim 250\text{\AA}$ 。在与光谱分辨垂直的方向上的空间分辨约为 $60\mu\text{m}$ 。在实验中主要使用 $\phi 50\mu\text{m}$ 的透射光栅。

采用 Kodak101 胶片记录光谱。在我们考虑的波长范围内 (光子能量小于 300eV), 此胶片与 Kodak 101-07 的光谱响应相同。因此, 我们采用 Henke^[14] 的定标结果:

$$D = \alpha[1 - \exp(-b\beta I)]. \quad (3)$$

式中, D 为胶片感光黑度; $\alpha = 1.957$, $b = 0.3128\mu\text{m}^2$, $\beta = 1.00$, I 为光强 (单位是光子数/ μm^2)。

实验中, 分别将针孔透射光栅谱仪沿线状等离子体轴线一端放置或离轴成 53° 角放置。

本实验中, 沿线状等离子体轴线另一端同时还放置了一台 1m 掠入射光栅谱仪, 该谱仪装有 2400 grooves/mm, 闪耀角为 2° 的镀金凹面光栅。当入射狭缝宽度为 $5\mu\text{m}$ 时, 仪器的光谱分辨率为 0.05\AA 。利用该谱仪已记录到类锂 Al^{+10} $5f-3d$ (105.7\AA) 跃迁的 ASE 作用^[15]。但由于该谱仪的接收光谱范围 ($20\text{\AA}\sim 120\text{\AA}$) 限制, 不能提供有关类锂 Al^{+10} 的 $4f-3d$ (154.7\AA) 跃迁的 ASE 信息。

实验中, 采用多发照射后的累积记录。由法拉第筒离子收集记录表明, 各单次打靶的条件相近, 胶片累积的记录效果只是光谱线强度的线性叠加。这种数据采集法在 Hara 等人的实验^[9] 中已经采用。

三、实验结果

实验中, 我们分别沿线状等离子体的轴向和非轴向测量类锂 Al^{+10} 离子的 $4f-3d$ (154.7\AA) 跃迁线上的强度。结果表明, 在沿轴线观测时, 在轴线上 154.7\AA 波长发射线十分明显; 而非沿轴线观测时, 该谱线消失为光谱背景 (见图 3)。在相同的靶面激光功率密度条件下, 我们测量了类锂 Al^{+10} 离子 154.7\AA 波长的发射强度随线状等离子体长度的变化。图 3 给

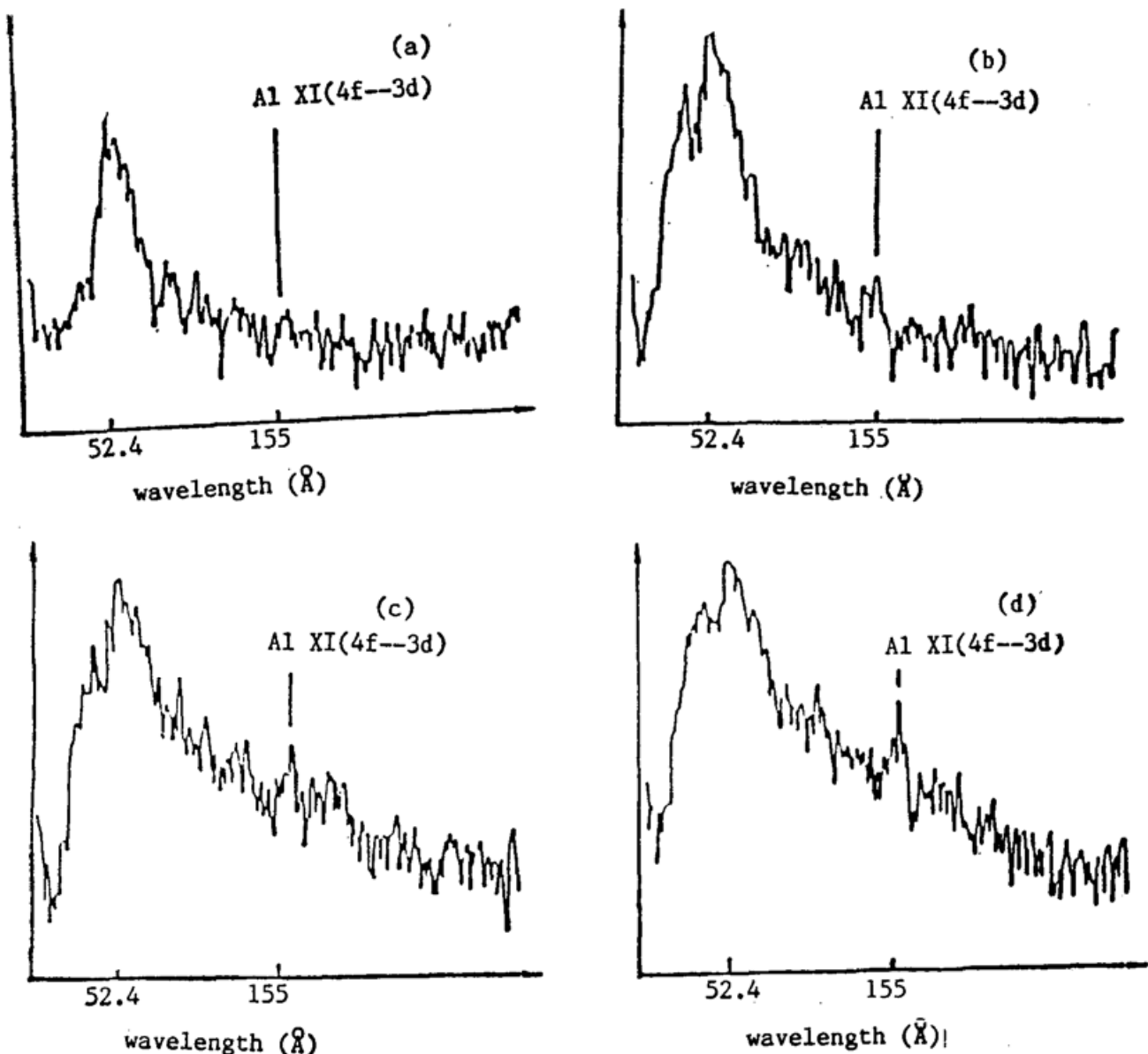


Fig. 3 Aluminum spectrum measured with a pinhole transmission grating spectrograph (resolution $< 4 \text{ \AA}$)

(a) 53° off-axis (b) on-axis, plasma column length $L=2.7 \text{ mm}$. (c) on-axis, plasma column length $L=6.8 \text{ mm}$. (d) on-axis, plasma column length $L=7.3 \text{ mm}$

出了 4 种不同长度线状铝等离子体在 155 \AA 波长上发射线强度的微密度扫迹。根据 Henke 关于 Kodak-01X 光胶片的定标结果, 考虑扣除连续谱背景强度, 我们可以得到相应于各种等离子体长度的 154.7 \AA 谱线的时间积分相对强度 (如图 4 所示)。增益系数 G 由谱线的强度与等离子体长度的依赖关系确定。将这些数据按公式

$$I_{\text{ASE}} = I_0 \frac{(e^{GL} - 1)^{3/2}}{(GL e^{GL})^{1/2}}$$

进行拟合, 其中 G 为增益系数, L 为线状等离子体长度, I 为谱线强度。我们得到类锂 Al^{+10} 离子 $4f-3d(154.7 \text{ \AA})$ 的跃迁的增益系数为 $3.7 \pm 0.9 \text{ cm}^{-1}$, 最大的增益长度积 (GL) 约为 2.7。

针孔透射光栅谱仪, 由于其空间分辨能力, 还同时给出了类锂 Al^{+10} 离子 154.7 \AA 发射的空间分布。图 5 是一张线状铝等离子体 154.7 \AA 发射谱的空间微密度扫迹, 其最大发射

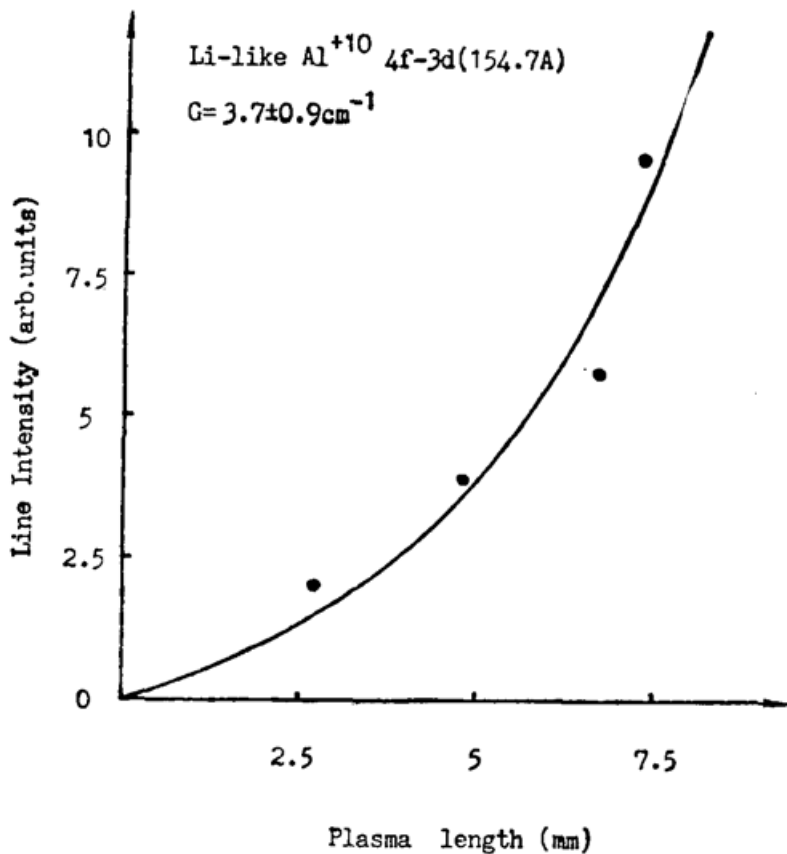


Fig. 4 Relative line intensity vs plasma length for the $4f-3d$ transition of Li-like Al^{+10} ions, along with the best fit gain curve for gain coefficient of $3.7 \pm 0.9 \text{ cm}^{-1}$

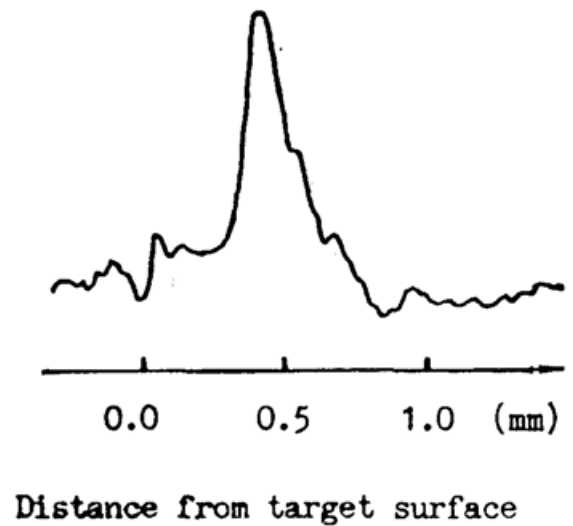


Fig. 5 The microdensitometer trace of spectral line of Li-like Al^{+10} ions $4f-3d$ transition along the normal of target surface

峰位于离开靶面约 $430 \mu\text{m}$ 处。这个结果与利用掠入射光栅谱仪, 在同一实验中^[15] 测量到的类锂 $Al^{+10}5f-3d$ 跃迁 (105.7 \AA) 的最大增益出现在距靶面处约 $440 \mu\text{m}$ 是一致的。分析指出, 这对应于驱动激光脉冲峰值后约 8 ns 时刻, 这时等离子体已经充分地绝热膨胀, 并迅速冷却复合而处于最佳的复合泵浦状态。

TLAP 晶体 X 射线谱仪(记录波长 $6 \sim 14 \text{ \AA}$)的测量结果表明, 在激光等离子体中, 类氦离子基本不存在, 而类氦离子(Al^{+11})丰度却较大, 表明我们选择的靶面激光功率密度是符合类锂离子复合泵浦要求的。

在类锂 $Al^{+10}5f-3d(105.7 \text{ \AA})$ 以及 $5d-3p(103.8 \text{ \AA})$ 处, 由于我们采用的透射光栅谱仪的分辨率($1 \sim 2 \text{ \AA}$)限制, 无法得到这些波长的 ASE 的定量结果。为此, 尚需进一步提高谱仪的分辨率(例如 $\sim 1 \text{ \AA}$), 这就需要具有更高刻线($\sim 5000 \text{ lines/mm}$)的透射光栅。

四、结 论

我们已成功演示了复合泵浦类锂铝离子的软 X 射线 ASE 增益放大。本文的结果表明, 采用复合泵浦类锂机制, 有可能在我们现有的驱动激光装置上将 X 射线激光按等电子序关系推进到更短波长。

参加本工作的还有王晓方, 李跃林, 钱爱娣, 余加进和冯贤平等。

本工作是在王之江所长直接关心和指导下进行的。作者向他致意。我们还要感谢六路激光装置运行组全体同志的大力支持与合作。

参 考 文 献

- [1] D. L. Matthews *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **54**, No. 2 (Jan), 110~113.
- [2] T. N. Lee, A. E. Mcleau & R. C. Elton; *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**, No. 11 (Sep), 1185~1188.
- [3] B. J. MacGowan *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**, No. 19 (Nov), 2157~2160. *JOSA., B*, 1988, **5**, No. 9 (Sep), 1858~1863.
- [4] S. Suckewer *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **55**, No. 17 (Oct), 1753~1756.
- [5] G. P. Keihn *et al.*; *SPIE.*, 1987, **831**, "X Rays from laser plasma", 270~274.
- [6] C. Chenais-Popovics, *et al.*; *Phys Rev. Lett.*, 1987, **59**, No. 19 (Nov), 2161~2164.
- [7] P. Jaeglé. *et al.*; *J. Phys B: At. Mol. Phys.*, 1985, **18**, No. 23 (Dec), 4647~4663.
- [8] C. Ragon *et al.*; "Central Laser Facility Annual Report," (Rutherford Appleton Laboratory, 1987), 13.
- [9] T. Hara *et al.*; *Japanese, J. Appl. Phys.* 1989, **28**, No. 6 (Jun), L1010~L1012.
- [10] 徐至展等; *Chinese Phys.* 1981, **1**, No. 3 (Jul-Sep), 548~556.
- [11] 徐至展等; *Opt. Comm.*, 1988, **69**, No. 1 (Dec), 49~53. *Phys. Rev. A.*, 1989, **39**, No. 2 (Jan), 809~815.
- [12] A. Pachtman *et al.*; In "proceeding of the Second Symposium on plasma-wave and plasma-matter interaction, Association for plasma studies of china", report No. APS-88-006, 1988, paper D-1.
- [13] 张正泉等;《光学学报》, 1988, **16**, No. 8 (Aug), 762~763.
- [14] Henke *et al.*; *J. Opt. Soc. Am.*, 1984, **B1**, No. 6 (Dec), 818~827.
- [15] 徐至展等;《中国科学》A 辑, 1990, No. 1 (Jan), 27~36.

Experiments on soft X-ray ASE of Li-like Al⁺¹⁰ ions 4f-3d transition

CHEN SHISHENG, XU ZHIZHAN, LIN LIHUANG, FAN PINZHONG AND ZHANGZHENGQUAN

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 29 March 1990; revised 4 May 1990)

Abstract

Experiments of soft X-ray amplified-spontaneous-emission (ASE) based on recombination pumping scheme were successfully performed on the Six-beam high power Nd³⁺-glass laser facility of SIOM. Using a home-made pinhole transmission grating spectrography, ASE has been observed in Li-like Al⁺¹⁰ ions 4f-3d(154.7 Å) transition in plasmas produced by irradiation of slab aluminum targets with line-focused laser light. Time integrated intensities of Li-like Al⁺¹⁰ ion spectral lines emitting along the axis of the plasmas were measured for a set of different plasma lengths. It is shown that the intensities of spectral lines of Li-like Al⁺¹⁰ 4f-3d transition increase exponentially with increasing plasma lengths, and the corresponding gain coefficient is $3.7 \pm 0.9 \text{ cm}^{-1}$. The maximum gain-length product being about 2.7.

Key words: soft X-ray laser; lasing gain coefficient.